



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ERKKA MÄKINEN
SÄHKÖVERKON SUURHÄIRIÖT, NIIDEN VAIKUTUKSET JA MI-
TEN NIITÄ VOITAISIIIN ESTÄÄ

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Tohtorikoulutettava Heidi Krohns-Välimäki
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
2. Helmikuukuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Erkka Mäkinen: Sähköverkon suurhäiriöt, niiden vaikutukset ja miten niitä voitaisiin estää

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 26 sivua

Toukokuu 2018

Tieto- ja Sähkötekniikan tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähkövoimatekniikka

Tarkastaja: Heidi Krohns-Välimäki

Avainsanat: jakeluverkko, suurhäiriö, sähkömarkkinalaki, myrskyt, vaikutukset, varautuminen

Sähköverkon suurhäiriö ei ole terminä vielä Suomessa vakiintunut ja asiaa sähköverkon suurhäiriöiden ympärillä on alettu seuraamaan tarkemmin vasta 2000-luvun suurien myrskyjen jälkeen. Myrskyt aiheuttivat sähkökatkoksia sadoille tuhansille sähköverkko-yhtiöiden asiakkaille ja saivat yhteiskunnan perusasiat sekaisin häiriöalueilla. Suurimpina ongelmina oli viestintäverkkojen toiminta, tiedottamisen puute sekä varavoiman riittävyys.

Tässä työssä tutustutaan sähköverkon suurhäiriöihin. Työssä kerrotaan mitä sähköverkon suurhäiriöt ovat ja annetaan lukijalle niistä selkeitä esimerkkejä. Tarkoitus on myös selvittää sähköverkon suurhäiriöiden vaikutuksia, kuten myös sitä, miten ne ovat vaikuttaneet tämän hetken lainsäädäntöön ja sähköjakeluverkon toimintavarmuuden parantamiseen. Myös tulevaisuuden kehitystoimenpiteitä verkon varmuuden parantamiseksi sivutaan lyhyesti.

Suurhäiriöihin liittyen mielenkiintoisia ovat etenkin vuoden 2001 Pyry ja Janika -myrskyt, vuoden 2010 Asta, Veera, Lahja ja Sylvi -myrskyt ja etenkin vuoden 2011 Tapani ja Hannu -myrskyt. Vuoden 2011 jälkeen poliittisetkin päättäjät olivat vakuuttuneita, että sähköverkonjakelun varmuutta on alettava parantamaan. Tämän seurauksena syntyi 1.9.2013 voimaan tullut uusi sähkömarkkinalaki, joka määrittelee sähköverkonhaltijoille selkeät vastuut ja velvoitteet.

Työssä on tarkoitus kertoa asiasta selkeästi ja siten, että lukijalla ei tarvitse olla alan kokemusta. Siksi työssä ei syvennytä tarkemmin sähköverkon teknologian yksityiskohtiin, vaan keskitytään enemmän kertomaan asiat tiivistetysti ja johdonmukaisesti.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SUOMEN SÄHKÖVERKKO	2
2.1	Kantaverkko	2
2.2	Jakeluverkko ja sähköverkon haltijat	3
3.	SUURHÄIRIÖTILANTEET	6
3.1	Pyry ja Janika -myrskyt.....	8
3.2	Gudrun-myrsky	9
3.3	Asta, Veera, Lahja ja Sylvi -myrskyt	9
3.4	Tapani ja Hannu -myrskyt.....	11
3.5	Lumikuormat	11
4.	SUURHÄIRIÖIDEN VAIKUTUKSET	13
4.1	Keskeytysten määrittäminen	13
4.2	Suurimmat vaikutukset.....	14
4.3	Sähkömarkkinalaki.....	16
4.4	Korvauskäytännöt.....	17
5.	SUURHÄIRIÖIHIN VARAUTUMINEN	19
5.1	Toteutetut toimenpiteet	19
5.2	Tulevaisuuden näkymät.....	21
5.3	Ongelmat	22
6.	YHTEENVETO	23
	LÄHTEET.....	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

CAIDI	engl. Customer Average Interruption Duration Index
MAIFI	engl. Momentary Average Interruption Frequency Index
SAIFI	engl. System Average Interruption Frequency Index
SAIDI	engl. System Average Interruption Duration Index

Muuttujat

n_j	asiakkaan j kokemien keskeytysten lukumäärä
t_{ij}	asiakkaalle j aiheutunut sähkökatko i ajallisesti
I	keskeytysten lukumäärä
j	keskeytysten vaikutusalueella olevien asiakkaiden lukumäärä
N_s	kaikkien asiakkaiden lukumäärä
n_{js}	asiakkaan j kokemien lyhyiden keskeytysten lukumäärä

1. JOHDANTO

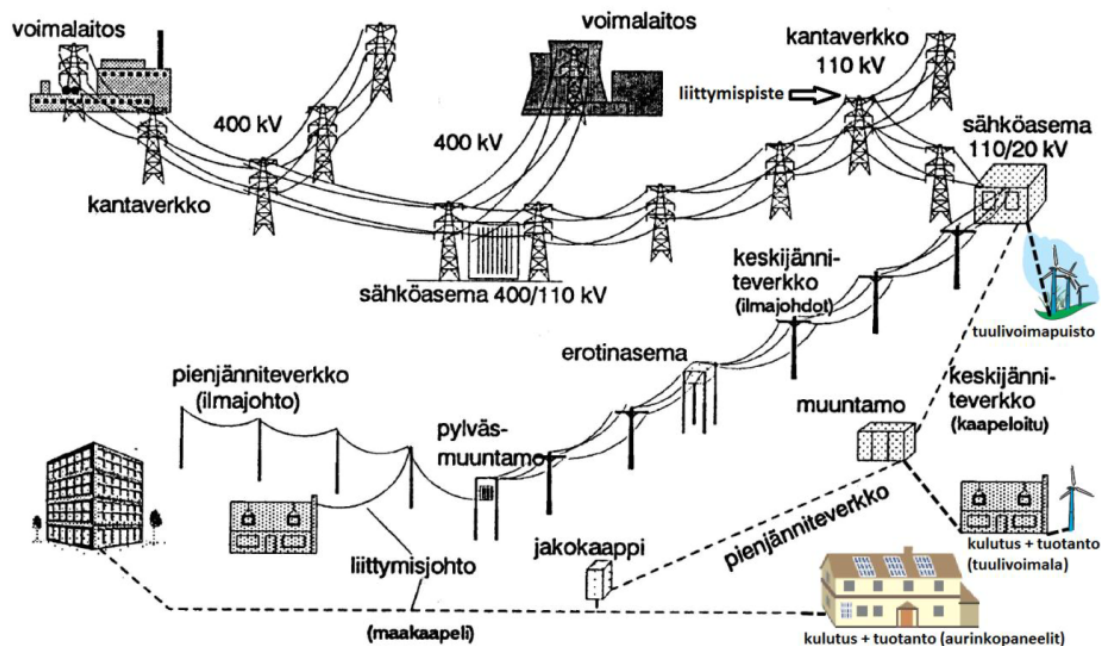
Sähköverkon suurhäiriöt ja sähköjakelun toimintavarmuus ovat viime aikoina olleet suuri puheenaihe. Termi suurhäiriö on ollut jo aiemmin käytössä, mutta vasta 2000-luvun myrskyt ovat alkaneet määrittää termille tarkemman sisällön. Myrskyt ja lumikuormat ovat aiheuttaneet pitkiä sähkökatkoja ja monet ihmiset ovat joutuneet olemaan ilman sähköä monien päivien ajan. Tämä on alkanut vaikuttaa sekä käyttäjien että lainsäätäjien ajatusmaailmaan, jonka seurauksena sähköjakeluvarmuutta on alettu parantaa järjestelmällisesti. Seurauksena on syntynyt nykyiselläänkin voimassa oleva sähkömarkkinalaki, joka takaa asiakkaille hyvälaatuisen sähkön ja paremman sähköjakeluvarmuuden.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää viime vuosien sähköverkon suurhäiriöitä. Työssä selvitetään Suomen sähköverkon rakenne ja siihen liittyvät ongelmat. Tämän jälkeen keskitytään erityisesti vaikutuksiltaan suuriin myrskyihin ja sähköverkon jakeluhäiriöihin. Työssä käydään myös läpi, miten suurhäiriöt ovat muuttaneet sähköverkon toimintavarmuuden vaatimuksia ja selvitetään suurhäiriöiden vaikutuksia sekä niihin varautumista.

Tutkielman alussa tutkitaan Suomen sähköverkon rakenne yleisesti, sekä selvitetään sähköverkon haltijoiden toimintaa. 3. luvussa selvitetään suurhäiriötilanteita sekä käydään vaikutuksiltaan suurimpia yksittäisiä häiriötilanteita tarkemmin läpi. Nämä suurhäiriöt ovat olleet suuri tekijä uutta sähkömarkkinalakia suunniteltaessa, sekä lisänneet sähköjakelun toimintavarmuuden vaatimuksia. 4. luvussa selvitetään suurhäiriöiden vaikutuksia ja korvauskäytäntöjä. Samassa luvussa käsitellään myös sähkömarkkinalaki lyhyesti. 5. luvussa käydään läpi, miten suurhäiriöihin on varauduttu ja millaiset sähköverkon tulevaisuudennäkymät ovat. Tutkielman lopussa kootaan työn keskeiset asiat lyhyesti yhteen.

2. SUOMEN SÄHKÖVERKKO

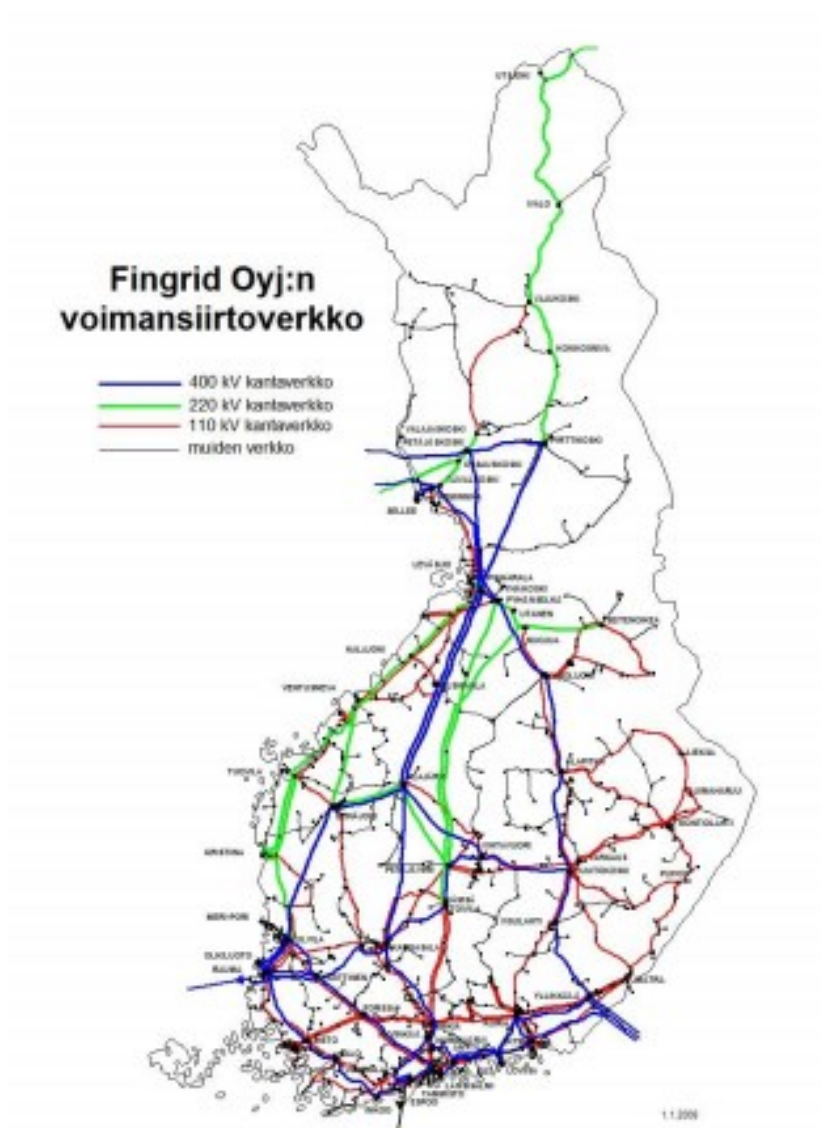
Sähköjakelujärjestelmän tehtävänä on varmistaa tuotetun sähkön siirto loppukäyttäjille. Koska sähkön siirrossa tapahtuu häviöitä, on taloudellista sijoittaa sähköntuotanto mahdollisimman lähelle kulutuspisteitä tai siirrettävä sitä suurella jännitteellä. [1]



Kuva 2.3 Suomen sähkönsiirto- ja jakelujärjestelmä [2]

2.1 Kantaverkko

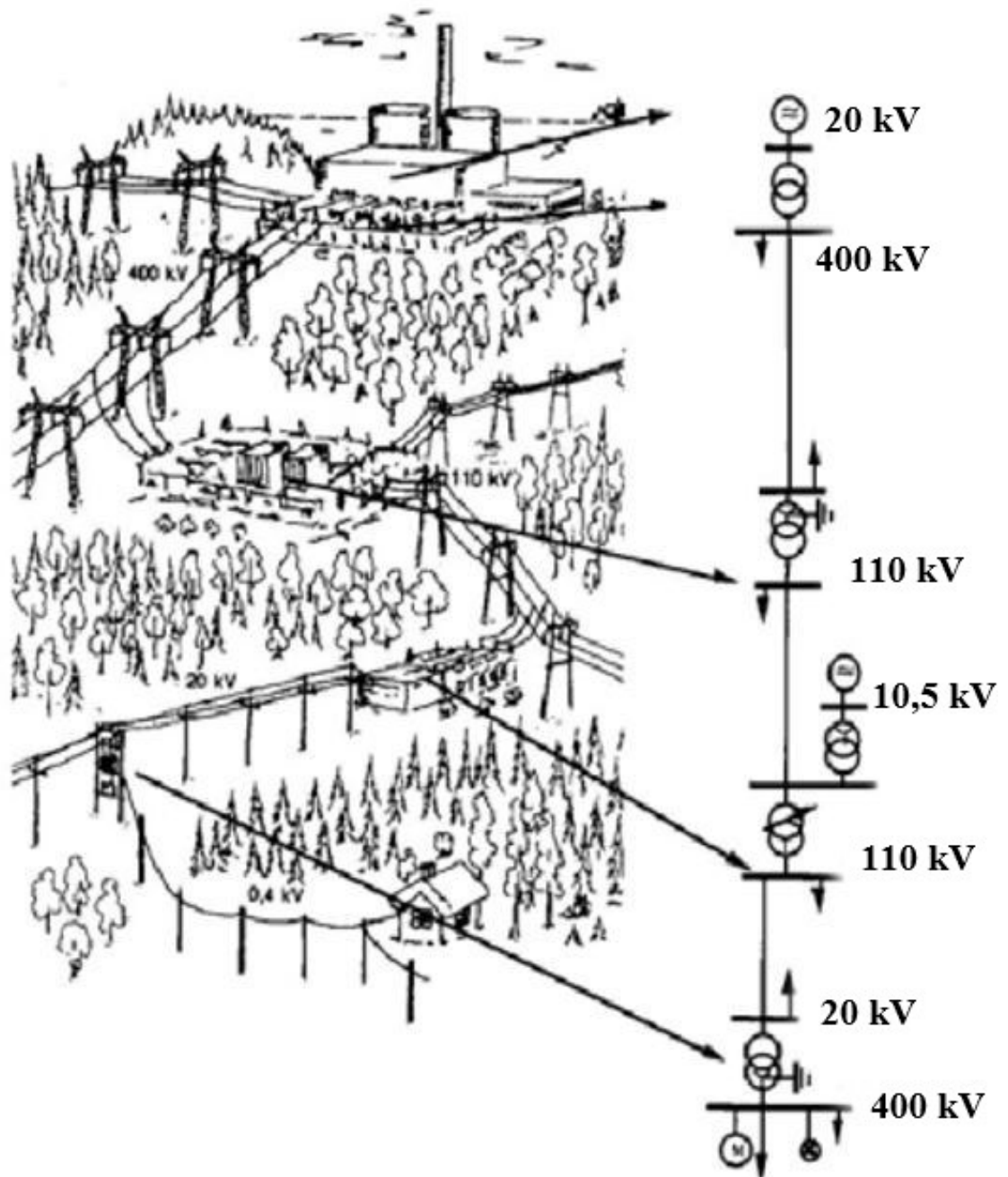
Suomen sähköverkko koostuu kantaverkosta, alueverkoista, sähköasemista, keskijänniteverkoista, jakelumuuntamoista ja pienjänniteverkoista. Kantaverkko koostuu 400kV, 220kV ja 110kV verkko-osuuksista ja sen järjestelmävastaavana toimii Fingrid Oyj. Järjestelmävastaavana kantaverkkoyhtiö huolehtii Suomen sähköjärjestelmän teknisestä toimivuudesta. Kuvassa 2.1 näkyy Suomen kantaverkon rakenne, missä on eroteltu eri jännitetason verkko-osuudet. [1]



Kuva 2.1 Suomen kantaverkko vuodelta 2009. [1]

2.2 Jakeluverkko ja sähköverkon haltijat

Suurin osa Suomen sähköverkon häiriöistä tapahtuu jakeluverkossa ja tässä tutkielmassa keskitytään Suomen sähköverkon tutkimiseen. Jakeluverkko koostuu sähköyhtiöiden hallinnoimista 0,4 – 70 kV keski- ja pienjänniteverkkoista. Joillakin sähköyhtiöillä voi olla myös 110kV sähköverkkoa hallittavanaan. Suomen jakeluverkko koostuu vielä suurelta osin vanhasta 20 kV ilmajohtoverkosta ja on siksi haavoittuvainen tuulelle ja myrskyille. Suurin osa johdoista on lisäksi metsän keskellä ja vaikeakulkuisilla alueilla, joten niiden korjaaminen on työlästä ja hidasta. [1] Kuvassa 2.2 on esimerkki Suomen jakeluverkosta. Kuvasta näkee, kuinka jakeluverkko liittyy kantaverkkoon, ja millä tavalla eri jännitteiset verkko-osat jakaantuvat.



Kuva 2.2 Suomen sähkönsiirto- ja jakelujärjestelmän rakenne [1]

Sähköverkon haltija on verkkopalveluita myyvä sähköyhtiö, jolla on hallinnassaan sähköverkkoa. Jakeluverkkoa omistavia yhtiöitä kutsutaan jakeluverkonhaltijoiksi. Suomessa sähköverkon haltijoita on yli 100 ja jokaisella jakelijalla voi olla omat hintansa, mutta sen pitää olla alueen kaikille asiakkaille sama. [3] Verkonhaltijan on tarjottava palveluita tasapuolisesti kaikille, ja sähkökaupan kilpailu pitää tapahtua ilman perusteettomia ehtoja. [4]

Sähköverkonhaltijan tulee taata riittävän hyvänlaatuinen sähkö kaikille verkon käyttäjille sekä kehittää ja käyttää sähköverkkoa vaatimusten mukaisesti. Sähkömarkkinalaki säättää verkonhaltijalle, että sähköverkon täytyy toimia luotettavasti normaalioloissa, sekä sen on täytettävä toimintaan liittyvät laatuvaatimukset. [4] Jännitteen laadun osalta suomessa käytetään eurooppalaista standardia EN 50160:2010. [5] Sähköverkko täytyy myös olla yhteensopiva muiden sähköjärjestelmien kanssa ja siihen on voitava liittää voimalaitoksia sekä käyttöpaikkoja [4].

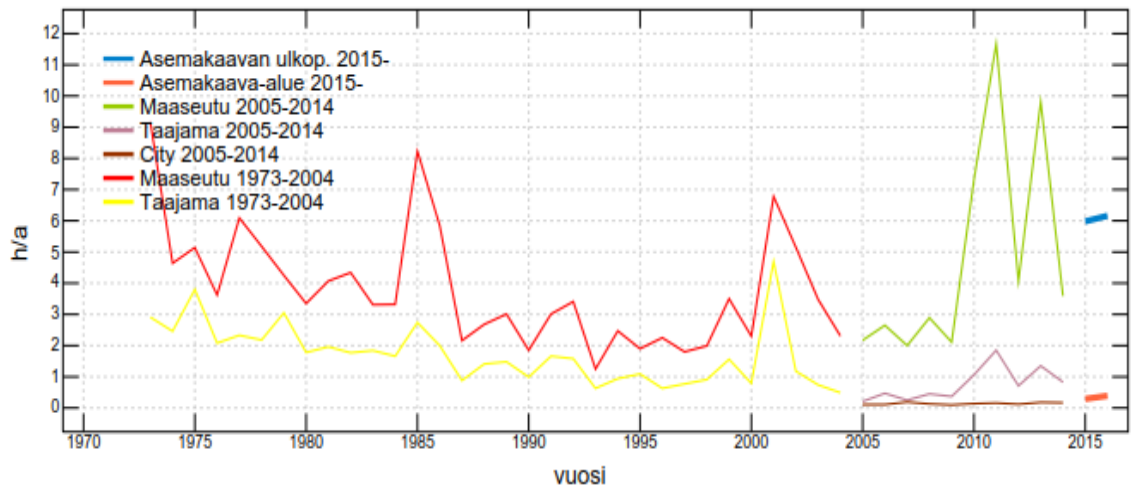
3. SUURHÄIRIÖTILANTEET

Aiempien tutkimusten mukaan sähköverkkoihin liittyen termi suurhäiriö on hyvin epäselvä. Sähköverkon suurhäiriöksi määritellään pitkäkestoinen tai laaja sähkökatko, mikä kohdistuu moniin ihmisiin ja vaatii viranomaisen toimenpiteitä. [6] Suurhäiriöksi kutsutaan myös tilannetta, joka vaatii ulkoisia resursseja ja toimintoja verkkoyhtiöiden normaalien toimintatapojen ulkopuolelta [7]. TTY ja LTY on vuonna 2005 määritellyt suurhäiriöksi tilanteen, jossa 20% sähköjakeluyhtiön asiakkaista on ilman sähköä. Jos edellä mainittu tilanne on korjattavissa ilman ulkopuolista apua muutaman tunnin kuluessa, on kuitenkin vaikea määrittää, onko kyseessä suurhäiriö. Toisaalta suurhäiriölle voidaan määrittää myös seuraavat ehdot: [6]

- Alueellisesti laajat vauriot jakeluverkolle.
- Jakelualueelle ennalta määritetty osuus verkon asiakkaista on samanaikaisesti ilman sähköä.
- Sähkön palauttaminen kestää yli tietyn ajan.

Tässä työssä käytetään yllä määritettyjä ehtoja, kuitenkin niin, että tarkkoja prosentuaalisia tai ajallisia määritelmiä ei lähdetä selvittämään.

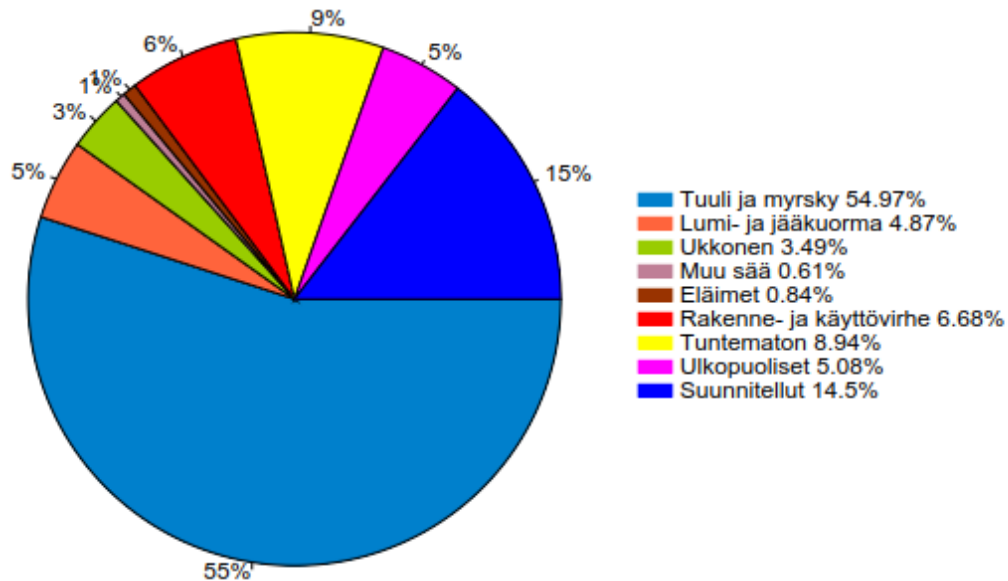
Suomessa suurhäiriöihin alettiin kiinnittää huomiota vuoden 2001 Pyry ja Janika -myrskyn jälkeen. Nämä myrskyt aiheuttivat pidempiaikaisia sähkökatkoja Suomessa, ja niiden vaikutus ulottui satoihin tuhansiin kuluttajiin. Myös Ruotsissa tapahtunut vuoden 2005 Gudrun-myrsky, jonka vaikutusalueelle joutui 730 000 asiakasta, huomioitiin vahvasti ja Suomessa alettiin seurata Ruotsin korjaavia toimenpiteitä. Viimeistään vuoden 2010 Asta, Veera, Lahja ja Sylvi -myrskyt nostivat sähköverkon toimintavarmuuden kansalliseksi puheenaiheeksi. Vuoden 2010 myrskyt aiheuttivat pisimmillään 42 päivän katkoksia ja vaikuttivat 481 000 kuluttajaan. [6] Vuoden 2001 ja 2011 myrskyt ovat selkeästi nähtävissä myös vuositason vikakeskeytysaikojen tilastoissa, kuten kuvasta 3.1 havaitaan.



Kuva 3.1 Asiakkaan keskimääräiset vikakeskeytysajat vuosilta 1973-2016. Tilastointitapa on muuttunut vuosina 2005 ja 2015 joka on kuvaajia vertailtaessa otettava huomioon. [8]

Nämä myrskyt alkoivat vaikuttaa myös lainsäätäjien päätöksiin ja seurauksena oli uusi sähkömarkkinalaki, joka astui voimaan 1.9.2013. Laki tuotti ensimmäistä kertaa sähkönjakeluyhtiöille selkeät vaatimukset jakeluvarmuudelle. Laissa säädettiin esimerkiksi pisimmät sallitut sähkönjakelun keskeytysajat, jotka ovat asemakaava-alueelle 6h ja sen ulkopuolelle 36h. Myös tiedonvaihtoa toimijoiden kanssa tulisi myös lisätä. Näiden lisäksi määriteltiin myös vakiokorvauskäytäntö, joka velvoitti jakeluyhtiöt maksamaan korvauksia keskeytysajan pituuden mukaan. [4]

Sähköverkon suurhäiriöiden suurin syy on tuulen ja myrskyjen aiheuttamat puiden kaatumiset avojohtojen päälle. Talvella myös puissa olevat lumi- ja jääkuormat saattavat aiheuttaa pidempiaikaisia sähkökatkoksia. [8] Kuvassa 3.2 on nähtävissä, kuinka vuoden 2016 kohdalla keskimääräinen keskeytysaika asiakkaalle yli puolet johtui tuulesta ja myrskystä.



Kuva 3.2 Keskimääräinen keskeytysaika asiakkaalla vuodelta 2016. [8]

3.1 Pyry ja Janika -myrskyt

Vuonna 2001 marraskuussa Pyry ja Janika myrskypäivät aiheuttivat jopa yli viikon mittaisia sähkökatkoksia ja vaikuttivat noin 860 000 asiakkaaseen. Prosentuaalisesti jakeluyhtiöiden asiakkaista ilman sähköä oli noin 37%. Myrskyt olivat suuruudeltaan sitä luokkaa, että sisäasianministeriö teetti selvityksen tuhojen yhteiskunnallisesta vaikutuksesta. Selvityksessä huomattiin miltä osilta toiminta oli puutteellista. Selvityksestä voitaisiin nostaa esiin seuraavia asioita: [6]

- jakeluyhtiöiden ja viranomaisten yhteysongelmat
- viestintäverkkojen ongelmat
 - matkaviestintäverkot 6 vuorokautta
 - viranomaisverkot 2 vuorokautta
- maatilojen ongelmat
 - eläinten terveys
- puutteellinen tiedottaminen
- veden riittämättömyys
- vanhusten hyvinvointi
- varavoiman riittävyys
- yleinen varautuminen puutteellista.

Pyry ja Janika -myrskypäivien tuulet olivat suuruudeltaan jopa 30 m/s ja puuskissa hetkellisesti huomattavasti kovempia. Ilmatieteen laitoksen mukaan vastaavia tuulen nopeuksia maa-alueilla oli mitattu ennen Pyryä ja Janikaa vuonna 1959. [9]

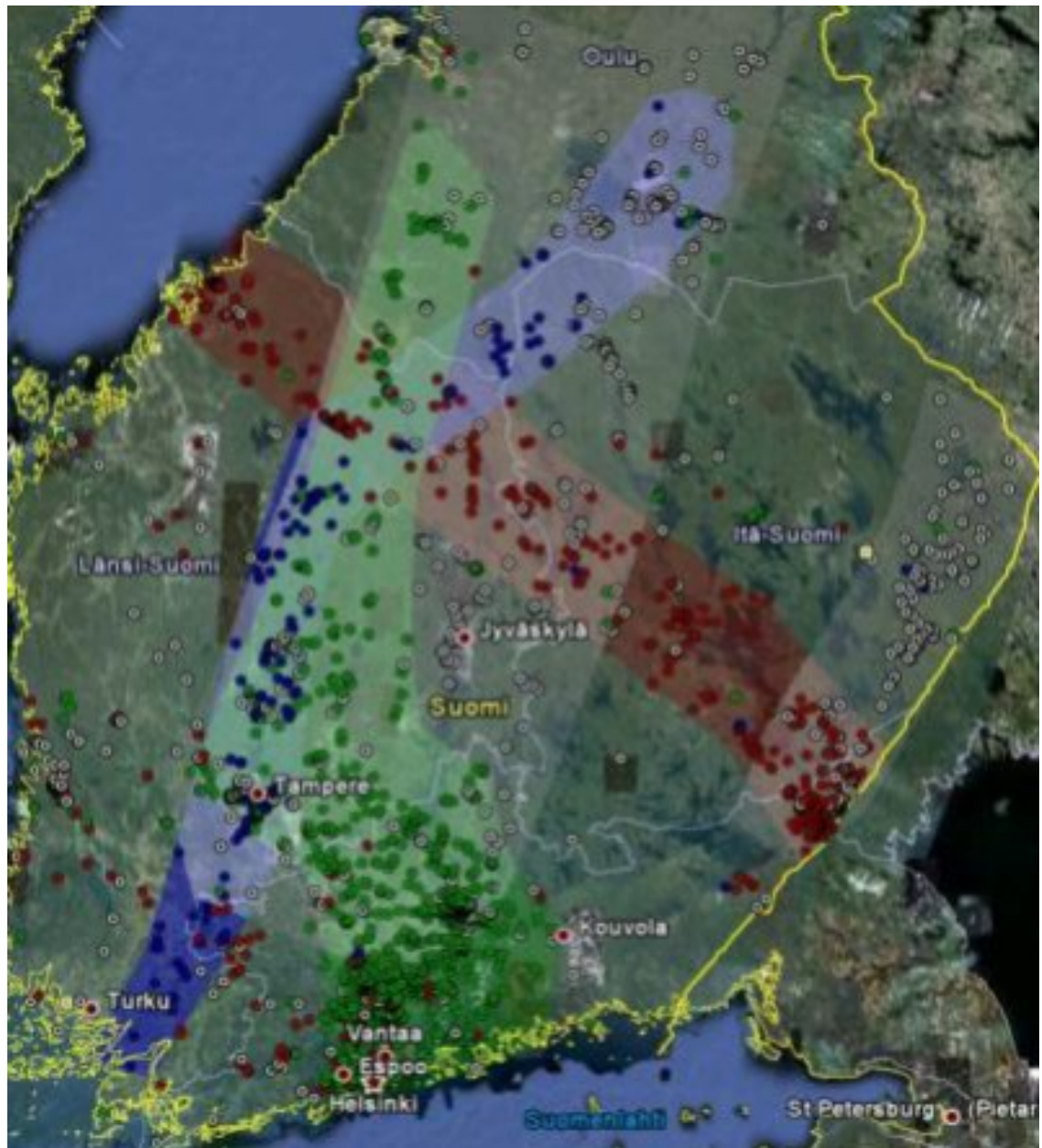
3.2 Gudrun-myrsky

Tammikuussa 2005 Etelä-Ruotsia ravistellut myrsky oli yhteiskunnalliselta vaikutukseltaan todella suuri. Se vaikutti yli 760 000 asiakkaaseen ja pisimmillään sähköjakelu oli keskeytynyt 45 vuorokauden ajan. Myrskyllä oli vastaavanlaisia seurauksia, kun Suomessa tapahtuneilla Pyry ja Janika –myrskyillä, mutta Gudrun-myrsky oli vaikutuksiltaan huomattavasti suurempi. Myrskyn jälkeen on nostettu esiin seuraavia ongelmia, joihin myöhemmin on alettu sähköverkon jakeluvarmuuteen liittyen kiinnittämään huomiota: [6]

- tilannetiedon puute
- verkonhaltijoiden tiedottaminen asiakkaille
- teiden raivaus ja siihen liittyvät resurssit
- asentajien ammattitaito ja määrä
- varaosien ja kaapeleiden puute
- varavoiman puute
- raivauksien turvallisuus (11 kuoli raivauksissa).

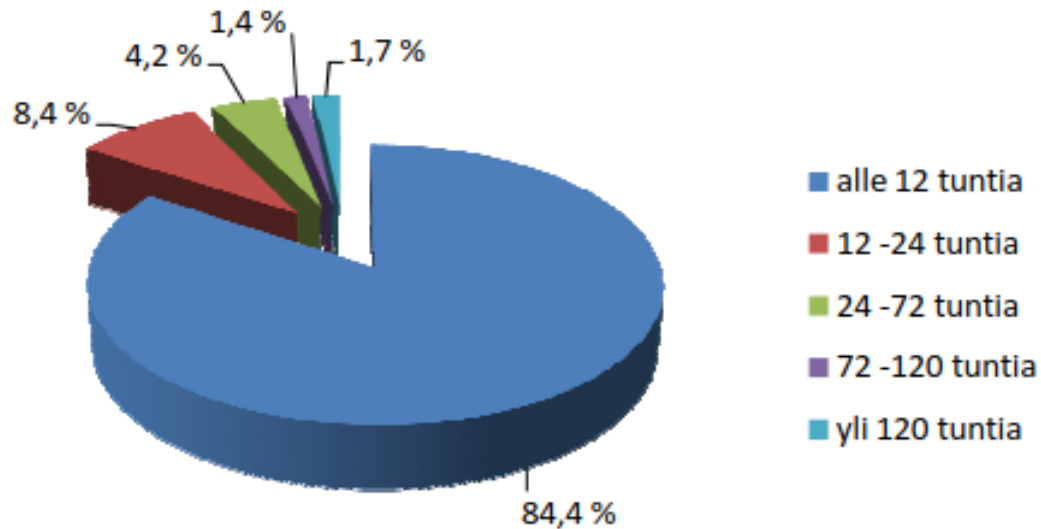
3.3 Asta, Veera, Lahja ja Sylvi -myrskyt

Vuodelle 2010 sattui monta myrskypäivää ja yhteensä ne aiheuttivat sähkökatkoksia yli 460 000 asiakkaalle. Pisimmillään sähkökatkot kestivät yli 42 vuorokautta ja koskettivat asiakkaita laajalla alueella, ympäri Suomessa. [6] Alueellisesti myrskyt koettelivat Suomea yli 100 000 km² alalta. Ajallisesti myrskyt osuivat hyvin lähelle toisiaan ja sen takia aiheuttivat ongelmia myös raivausten suhteen. Asta-myrsky koetteli Suomea 29.-30.7.2010, kun taas Veera-myrsky kulki Suomen yli 4.8.2010. Lahja-myrsky taas osui Suomeen 7.8.2010 ja heti seuraavana päivänä 8.8.2010 oli Sylvi-myrskyn vuoro. Kuvassa 3.3 on havainnollistettu myrskyjen kulkusuunta ja niiden pääpiirteinen vaikutusalue. [10] Veera-myrskyssä tuhoisien syöksyvirtausten tuulen nopeudet nousivat yli 30 m/s [11].



Kuva 3.3 Vuoden 2010 myrskyt. Asta punaisella, Veera valkoisella, Lahja sinisellä ja Sylvi vihreällä [10]

Yhteiskunnalliset ongelmat olivat hyvin pitkälti samanlaisia kuin Pyry ja Janika –myrskyissä [5]. Verkonhaltijoille myrskyt aiheuttivat yli 22 miljoonan euron kustannukset pelkästään korjauskuluina. Tämän lisäksi verkonhaltijat joutuivat maksamaan vakiokorvauksia tuhansille asiakkaille. Sähkömarkkinalain mukaan vakiokorvaus on maksettava, jos sähkökatko kestää yli 12h. Kuvasta 3.4 nähdään, että suurin osa sähkökatkoista saatiin korjattua nopeasti, mutta pisimmillään asiakkaat olivat ilman sähköä jopa 1000 tuntia. [10]



Kuva 3.4 Vuoden 2010 myrskyjen aiheuttamien sähkökatkojen jakautuminen [10]

3.4 Tapani ja Hannu -myrskyt

Suomeen osui vuonna 2011 siihen mennessä tuhoisimmat myrskyt jakeluverkon kannalta. Myrskyt osuivat peräkkäisinä päivinä 26.-27.12. ja saivat nimekseen Tapani ja Hannu -myrskyt. Myrskyjen tuhot olivat samanlaisia kuin aiemmissakin myrskyissä, mutta olivat vaikutuksiltaan huomattavasti aiempia pahemmat. Myrskyt vaikuttivat yli 371 000 asiakkaaseen ja pelkästään vakiokorvauksina jakeluyhtiöt joutuivat maksamaan asiakkailleen yli 46 miljoonaa euroa. [12]

Myrskyjen tuhojälkien korjauksia haittasi myrskypäivien perättäisyys, sekä toisin kuin aiemmat myrskyt Tapani ja Hannu -myrskyt tapahtuivat talvella. Näiden ongelmien takia myös sähkönjakelun katkot olivat pidempiä ja talven kylmyys entisestään lisäsi niiden haittavaikutuksia. Näiden suurien yhteiskunnallisten vaikutusten takia työ- ja elinkeinoministeriö alkoi valmistella muutoksia sähkömarkkinalakiin, joiden lähtökohtana oli sähkönjakeluverkon toimintavarmuuden parantaminen. Uusi sähkömarkkinalaki astuiikin voimaan 1.9.2013. [12]

3.5 Lumikuormat

Myös lumikuormat ovat aiheuttaneet sähkönjakeluun liittyviä suurhäiriöitä. Suuret lumimäärät painavat puiden oksia avojohtojen päälle, jolloin ne aiheuttavat sähkökatkoja. Eri-tyisesti vuoden 2010 myrskyjen jälkeen huomiotiin suuresti talvella 2011 tapahtuneet sähkökatkot, jotka johtuivat juurikin suurista lumikuormista. Talvella tapahtuneet jopa kaksi viikkoa kestäneet sähkökatkot olivat yhteiskunnallisesti ongelmallisia erityisesti kovien pakkasten takia. Myös korjaustyöt olivat ongelmallisempia, koska suuret lumimäärät haittasivat liikkumista entisestään. [6]

Viimeisin suurhäiriö tapahtui vuosien 2017 ja 2018 vuodenvaihteessa Kainuussa. Tykkylumi taivutti puiden oksia ilmajohtojen päälle ja aiheutti jopa 6 500 taloudelle sähkökatkoksia 29.11.-1.1. välisenä aikana. Pisimillään asiakkaat joutuivat olemaan yli neljä vuorokautta ilman sähköä. Kainuun suurhäiriön aikana matkapuhelinverkoissa oli paljon häiriöitä ja kylmä sää aiheutti ongelmia sekä asiakkaille että korjaajille. Yhteensä sähköverkon katkoksia oli korjaamassa satoja asentajia ja tuli maksamaan jakeluyhtiölle yli 4,5 miljoonaa euroa. [13]

4. SUURHÄIRIÖIDEN VAIKUTUKSET

Sähköverkon jakeluhäiriöitä on helpompi hahmottaa, kun tiedetään keskeytysten vaikutukset. Tämän takia on määritetty erilaisia luotettavuusindeksejä ja keskeytysten kestojen raja-arvoja. Suurhäiriöiden vaikutuksia voi myös jakaa ajallisesti ja rahallisesti, sillä se on selkeä tapa hahmottaa sähköverkon jakeluhäiriöiden vaikutuksia. Tässä työssä tutkitujen myrskyjen vaikutukset ovat olleet suuruusluokaltaan niin vaikuttavia, että niillä on ollut vaikutuksia myös viranomaisvalmiuden määrittämisessä. [6]

Suurhäiriöiden seurauksesta on myös tehty useita tutkimuksia ja raportteja. Selkeä esimerkki on Tampereen teknillisen yliopiston ja VTT yhteistyössä toteutettu raportti (Sähköhuollon Suurhäiriöiden Riskianalyysi- ja Hallintamenetelmien Kehittäminen). Sähköverkon haltijat ovat myös teettäneet omia riskianalyysyjään ja kehittämissuunnitelmiaan, jotta he pystyvät vastaamaan sähkömarkkinalain vaatimuksiin. Työssä käydään myöhemmin läpi näiden raporttien suurimpia huomiota liittyen sähköverkon jakeluvarmuuteen ja suurhäiriöiden estämiseen liittyen. [6]

4.1 Keskeytysten määrittäminen

Sähköverkon suurhäiriöt ovat vaikuttaneet satoihin tuhansiin asiakkaisiin ympäri Suomea. Sähköverkon jakeluhäiriötä voidaan mitata monella tapaa, joista yleisimmät ovat SAIFI, SAIDI, CAIDI ja MAIFI. [14] Energiavirasto määrittää lähes vuosittain keskeytystilastot mistä voidaan helposti nähdä myrskyvuosien keskeytyspoikkeamat normaaleihin vuosiin nähden. Näitä indeksejä käyttämällä on huomattavasti helpompi hahmottaa keskeytysten vaikuttavuus.

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) tarkoittaa keskeytysten keskimääräistä lukumäärä kaikkiin asiakkaisiin nähden. SAIFI lasketaan seuraavalla kaavalla. [14]

$$SAIFI = \frac{\text{asiakkaiden kokemien keskeytysten kokonaismäärä}}{\text{kokonaisasiakasmäärä}} = \frac{\sum_j n_j}{N_s}$$

SAIDI (System Average Interruption Duration Index) Tarkoittaa keskeytysten keskimääräistä kestoaikaa kaikkiin asiakkaisiin nähden. SAIDI lasketaan seuraavalla kaavalla [14]

$$SAIDI = \frac{\text{asiakkaiden kokonaiskeskeytysaika}}{\text{kokonaisasiakasmäärä}} = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{N_s}$$

CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) tarkoittaa asiakkaalle kohdistuvien keskeytysten keskipituutta. CAIDI lasketaan seuraavalla kaavalla. [14]

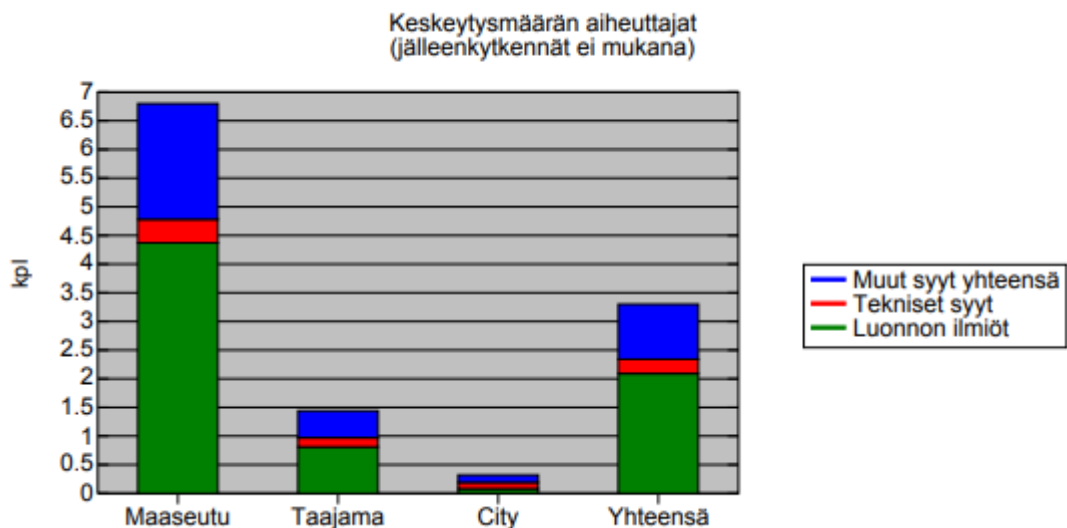
$$CAIDI = \frac{\text{asiakkaiden kokonaiskeskeytysaika}}{\text{asiakkaiden kokonaiskeskeytysmäärä}} = \frac{\sum_i \sum_j t_{ij}}{\sum_j n_j} = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

MAIFI (Momentary Average Interruption Frequency Index) tarkoittaa lyhyiden (alle 3 min) keskeytysten lukumäärää kaikkiin asiakkaisiin nähden. MAIFI lasketaan seuraavalla kaavalla. [14]

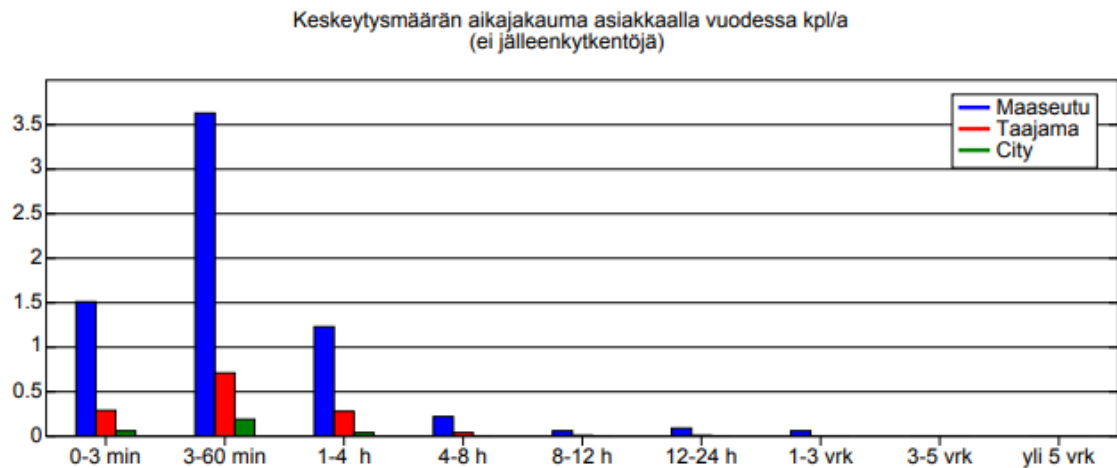
$$MAIFI = \frac{\text{asiakkaiden kokemien lyhyiden kesk.summa}}{\text{kokonaisasiakasmäärä}} = \frac{\sum_j n_{js}}{N_s}$$

4.2 Suurimmat vaikutukset

Tässä työssä sähköverkon suurhäiriöt on jaettu ajallisesti ja rahallisesti. Ajallisesti suurhäiriöt on helpompi jakaa, sillä ne ovat suoraan havaittavissa energiaviraston tuottamissa keskeytystilastoissa. Suomessa jakeluverkko koostuu vieläkin suurimmaksi osaksi avojohtoista, jotka ovat herkkiä tuulelle ja myrskyille. Avojohto-osuudet ovat suurimmaksi osaksi asemakaava-alueen ulkopuolella ja siksi suurhäiriöt ovat vaikuttaneet enemmän näillä alueilla. Tällä hetkellä Suomen suurimmat kaupungit on maakaapeloitu lähes 100-prosenttisesti. [10] Kuvassa 4.1 on selkeästi nähtävissä, kuinka suuret erot keskeytysmäärissä on asemakaava-alueen ja sen ulkopuolelle jäävien osuuksien välillä.



Kuva 4.1 Vuoden 2011 keskimääräinen lukumäärä asiakkaalla vuodessa, SAIFI [15]

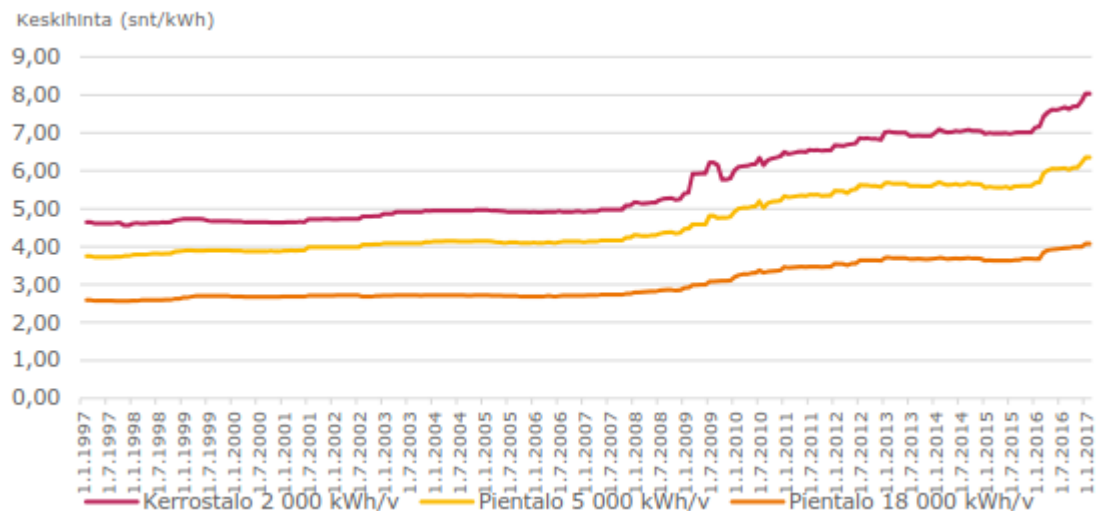


Kuva 4.2 Vuoden 2011 keskeytysmäärien asiakasjakauma kpl/a, vuotuisen keskeytysajan suhteen [15]

Kuvasta 4.2 huomaa selkeästi kuinka pidemmät sähköjakelukatkot aiheutuvat lähes yksinomaan asemakaava-alueen ulkopuolella. Syyt tähän ovat pääosin avojohdoille tapahtuvat vauriot, yleisemmin esimerkiksi puun kaatuessa niiden päälle. Asemakaava-alueen ulkopuolella avojohdot lisäksi sijaitsevat kaukana ja ovat vaikeasti tavoitettavia, joten niiden korjaaminen kestää kauan. [8] Suurin osa vuoden 2001 ja 2010 myrskyjen asiakkaista asuivatkin asemakaava-alueen ulkopuolella ja suurten raivaustöiden takia he joutuivat olemaan ilman sähköä pahimmillaan monia päiviä. [6]

Rahallisesti suurhäiriöitä on hankalampi määrittää kuin ajallisesti. Sähköverkon haltijoita on suuri määrä ja jokaisella on erilainen verkko hallinnoitavana. Myös myrskyjen aiheuttamien vaurioiden ennustaminen ja jakautuminen ovat hyvinkin vaihtelevaa. Lisäksi myrskyjen aiheuttamat tuhot menevät osaksi ristiin muiden korvausten kanssa. Vuoden 2010 kohdalla todettiin, että myrskyt aiheuttivat suoraan verkonhaltijoille korjauskuluina 22 miljoonaa euroa. Lisäksi vakiokorvauksina samana vuonna verkonhaltijoille koitui maksettavaa useita miljoonia euroja. Voidaan kuitenkin todeta jokaisen suurhäiriön maksavan verkonhaltijoille miljoonia euroja. [6]

Rahalliset seuraamukset suurhäiriöistä eivät koske pelkästään verkonhaltijoita. Myös asiakkaat joutuvat kärsimään niiden vaikutuksista. Sähköjakeluyhtiöt toimivat kohtuullisen tuoton periaatteella, eli heillä on rajattu tuottoprosentti. Yhtiöt kuitenkin voivat sisällyttää kunnossapito- ja investointikustannuksiaan tuloslaskelmiinsa, mikä taas laskee tuottavuutta. Sähköverkkoyhtiöt ovat joutuneet tekemään viime vuosina suuria investointeja, jotta pääsevät sähkömarkkinalain asettamiin toimintavarmuusvaatimuksiin. Nämä investoinnit tulevat myöskin kasvamaan tulevaisuudessa. Kuvasta 4.3 on huomattavissa etenkin vuodesta 2009 alkanut siirtohintojen tasainen kasvu. [16]



Kuva 4.3 Tyypin käyttäjien verottoman siirtohinnan kehitys vuosilta 1997 – 2016 [16]

4.3 Sähkömarkkinalaki

Nykyuotoinen sähkömarkkinalaki tuli voimaan 1.9.2013. Työssä aiemmin käytyt suurhäiriöt ja etenkin 2011 Tapani ja Hannu -myrskyt vaikuttivat lain muutoksiin suuresti. Sähkömarkkinalaki määrittelee peruseriaatteen Suomen sähkömarkkinoille. Se varmistaa, että sähkön toimitusvarmuus ja sähkön laatu pysyvät riittävän hyvänä. Lain tarkoitus on myös varmistaa ympäristön kannalta suotuisasti tuotettu sähkö, jonka hinta pysyy kilpailukykyisenä. Sähkömarkkinalaki määrittää tarkat laatuvaatimukset sähköjakeluverkolle, sekä antaa selkeät rajoitteet koskien sähköverkkoyhtiöitä. [4]

Tähän työhön liittyen erityisen kiinnostavaa on laissa asetettu jakeluverkon kehittämissuunnitelma, joka velvoittaa verkonhaltijat järjestelmällisesti parantamaan luotettavuutta ja huomioida erityisesti sähkönsaataavuus yhteiskunnallisesti kriittisissä paikoissa. Sähkömarkkinalain pykälän §119 mukaan jakeluverkonhaltija tulee parantaa jakeluverkon toimintavarmuutta vuoteen 2028 mennessä seuraavasti: [4]

- Verkko täyttää järjestelmävastaavan asettamat laatua ja varmuutta koskevat määritelmät.
- Myrskyn tai lumikuorman seurauksena oleva sähkökatko saa kestää enintään 6h asemakaava-alueella.
- Myrskyn tai lumikuorman seurauksena oleva sähkökatko saa kestää enintään 36h asemakaava-alueen ulkopuolella.

Sähkömarkkinalain mukaisesti jakeluverkon toimintavarmuuden on täyttyvä seuraavan aikataulun mukaisesti: [4]

- Vuoden 2019 loppuun mennessä vaatimusten pitää olla toteutunut vähintään 50 % jakeluverkon asiakkaista.

- vapaa-ajan asunnot eivät vielä mukana
- Vuoden 2025 loppuun mennessä vaatimusten pitää olla toteutunut vähintään 75 % jakeluverkon asiakkaista.
 - vapaa-ajan asunnot eivät vielä mukana
- Vuoden 2028 loppuun mennessä vaatimusten pitää olla toteutunut kaikkien asiakkaiden osalta.

Tätä kehittämissuunnitelmaa valvoo Energiavirasto, joka voi velvoittaa verkonhaltijoita tekemään muutoksia heidän kehittämissuunnitelmansa tarpeen vaatiessa. Mikäli sähkönjakeluverkkoyhtiö oli katsonut, ettei pysty näihin vaadittuihin aikatauluihin, heillä oli painavista syistä johtuen hakea lisää aikaa. Painavaksi syyksi katsottiin esimerkiksi suhteellisen pitkät johtopituudet ja todella hajautuneet asiakkaat. [4]

Sähkön laadun osalta Suomessa noudatetaan eurooppalaista standardia EN 50160:2010. Standardissa kuvataan pien-, keski- ja suurjännitejakeluverkon ominaisuudet ja määritellään seuraaville raja-arvot: [5]

- verkkotaajuus
- jännitetasen vaihtelut
- välkyntä
- jännitteen epäsymmetria
- harmoniset yliaaltojännitteet
- signaalijännitteet.

4.4 Korvauskäytännöt

Sähkömarkkinalaki määrittelee verkonhaltijoille myös selvät korvausmenetelmät sähkökatkon kestäessä liian kauan. Asiakkaalla on oikeus kahden viikon vastaavaan hinnan alennukseen vuotuisesta siirtohinnoista, jos sähkönjakelussa, muussa verkkopalvelussa tai sähköntoimituksessa on tapahtunut virhe. Virheelle on määritelty seuraavat ehdot: [4]

- Laskutus on virheellinen tai se on viivästynyt.
 - Virhe täytyy olla vähittäismyyjästä johtuva.
- Sähkö ei vastaa laadultaan Suomessa noudatettavia standardeja.
- Sähköntoimitus on yhtäjaksoisesti tai usein keskeytynyt ja sen syyt ovat vähäisiä.

Suurhäiriöihin liittyen mielenkiintoinen on vakiokorvauskäytäntö. Vakiokorvauskäytännön mukaan asiakas on oikeutettu prosentuaaliseen osuuteen vuotuisesta siirtopalvelumaksusta keskeytysajan pituuden mukaan. Alun perin vakiokorvaukset otettiin käyttöön Pyry ja Janika -myrskyjen seurauksesta ja niitä korotettiin uusitun lain myötä. Korvausten tarkoituksena on toimia kannustimena jakeluverkon toimintavarmuuden parantamiseksi. Taulukosta 4.1 on selkeästi nähtävissä, miten sähkönjakelun keskeytysaika vaikuttaa korvauksen määrään. [4]

Korvaus vuotuisesta siirtopalvelumaksusta (Prosenttia)	Keskeytysaika (tuntia)
10 %	12h – 24h
25%	24h – 72h
50%	72h – 120h
100%	120h – 192h
150%	192h – 288h
200%	288h -

Taulukko 4.1 Vakiokorvaukset keskeytysajan mukaan [4]

Vakiokorvauksen enimmäismäärä on 200% vuotuisesta siirtomaksusta. Eduskunnan talousvaliokunta on myös lisännyt sähkömarkkinalakiin, että asiakas on oikeutettu korvaukseen ilman eri vaatimusta. Korvaukselle on määritetty myös rahallinen enimmäismäärä seuraavasti: [3].

- 1000 euroa, mikäli keskeytys alkoi ennen 1.1.2016
- 1500 euroa, mikäli keskeytys alkoi ennen 1.1.2018
- 2000 euroa, mikäli keskeytys on alkanut 1.1.2018 jälkeen.

5. SUURHÄIRIÖIHIN VARAUTUMINEN

5.1 Toteutetut toimenpiteet

Vuonna 2013 voimaan tullut sähkömarkkinalaki on määritellyt verkonhaltijoille ehdot verkon toimintavarmuuden parantamiseksi [4]. Suurin osa verkonhaltijoista on toteuttanut tämän maakaapelioimalla tai raivauksia tehostamalla siellä, missä maakaapelointi ei ole taloudellisesti mahdollista. [16] Maakaapelointi on erityisen kiinnostavaa sähköjakeluverkon toiminnan kannalta, sillä se vähentää sähkökatkoksia ja on huomattavasti varmempi tuulen ja myrskyn aiheuttamille vaurioille kuin vanha avojohtoverkko. [6]

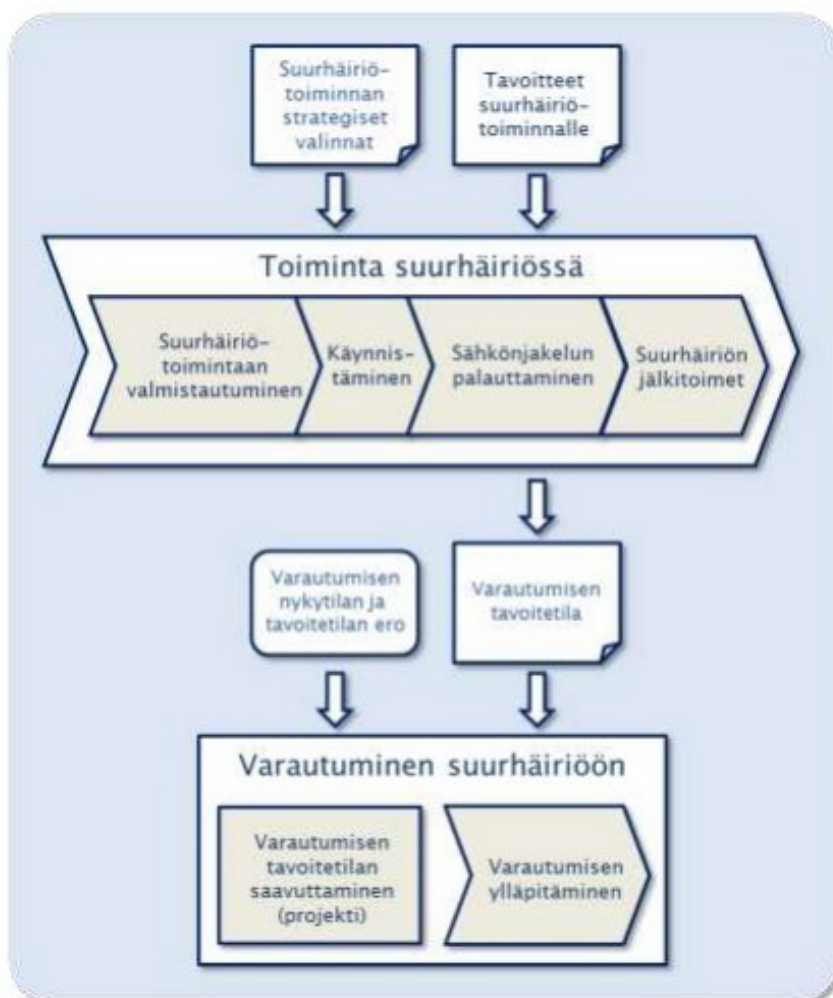
Vuosi	Keskijänniteverkon maakaapelointiaste %	Pienjänniteverkon maakaapelointiaste %
2009	10,9	35,3
2010	11,6	36,3
2011	12,3	37,5
2012	13,2	38,6
2013	14,5	39,0
2014	16,4	40,8
2015	17,6	41,4
2016	18,8	42,0
2019	28	49
2023	37	57
2028	47	65

Taulukko 5.1 Jakeluverkkoyhtiöiden maakaapelointiaste vuosilta 2009 -2016, sekä arvio vuoteen 2028 tapahtuvasta kaapeloinnista. [16]

Vuosina 2014 ja 2015 verkkoyhtiöt ovat investoineet maakaapelointiin 916 miljoonaa euroa. Tällä kahden vuoden aikajaksolla verkkoa on maakaapeloitu 16 500 km, mikä on 22 prosenttia enemmän kuin vuonna 2014 oli suunniteltu. Siltä osin verkkoyhtiöt ovat parantaneet maakaapelointitahtiaan. [16]

Taulukosta 5.1 on nähtävissä sähköjakeluyhtiöiden maakaapelointiasteet, sekä tulevat tavoitteet vuoteen 2028 asti, jolloin sähkömarkkinalain mukainen verkonvarmuus pitää kattaa kaikki asiakkaat. Taulukosta on nähtävissä, että verkkoyhtiöt panostavat verkonvarmuuden ylläpitoon, mutta jotta yhtiöiden tavoitteeseen päästään, on maakaapelointitahtia kiristettävä tämänhetkisestä.

Energiateollisuuden vuonna 2012 teettämän tutkimuksen mukaan (Toiminta Sähkönjakelun Suurhäiriössä) suurhäiriöön liittyvä toiminto jakautuu kahteen vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on ennakkoon tehdyt varautumissuunnitelmat ja toinen on toiminta itse suurhäiriön aikana. Tutkimuksessa tärkeä osa on valmistautuminen ja mahdollisten uhkakuvioiden pohdinta. Sähköverkkoyhtiöt ovatkin tehneet sähkömarkkinalain vaatimat varautumissuunnitelmat suurhäiriöiden varalla. Tämä varautumissuunnitelma on päivitettävä aina suurien olosuhdemuutosten jälkeen, kuitenkin vähintään kerran kahdessa vuodessa. [4][7] Kuvassa 5.1 on raportin mukainen suurhäiriöön varautumisen suunnittelun rakenne.



Kuva 5.1 Suurhäiriöön varautumisen suunnittelu (Toiminta Sähkönjakelun Suurhäiriössä raportin mukaan) [7]

5.2 Tulevaisuuden näkymät

Kuten taulukosta 5.1 on selkeästi nähtävissä, sähkömarkkinalain asettamat vaatimukset eivät tule toteutumaan vuoteen 2028 mennessä. Sähköverkonhaltijoilla oli vuoden 2017 loppuun asti aikaa hakea lisääaikaa ja lähes poikkeuksetta kaikki sähköjakeluyhtiöt näin myös tekivät. Lisääaikaa kuitenkin sai ainoastaan 75 prosentin valmiuden osalta vuoteen 2036 asti. Etenkin verkonhaltijat, joilla on huomattavan suuri osuus verkko-omaisuudestaan haja-asutusalueella ja joiden asiakkaat ovat harvallaan olivat oikeutettuja tähän lisäaikaan. [4]

Sähköverkon jakeluvarmuutta tullaan jatkossakin vielä lisäämään ja maakaapelointiaste on tulevaisuudessa 100 prosenttia suurilla asutusalueilla. Kustannusten takia maakaapelointia ei koskaan tehdä koko Suomen mittakaavassa eikä se ole myöskään tarkoitustensa mukaista. Laki tosin jatkossakin määrittää, että sähköverkkoon investoidaan ja sen toimintavarmuutta kehitetään. [4]

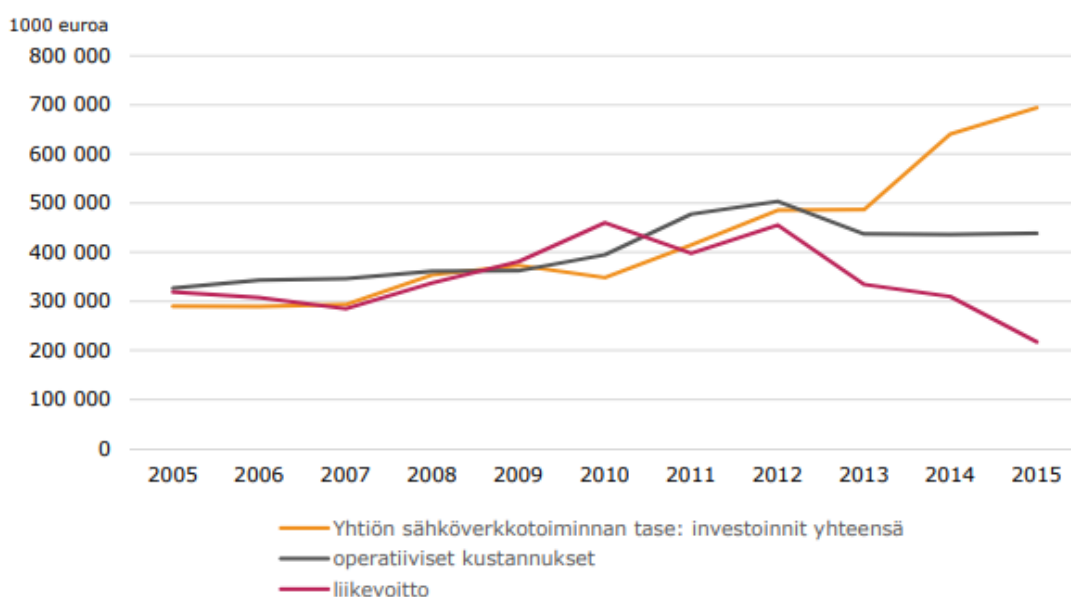
Vuoden 2010 myrskyjen jälkeen tehtyjen raporttien mukaan useilla sähköverkkoyhtiöillä oli varautumissuunnitelma, mutta lähes poikkeuksetta niissä oli kehittämistarpeita. Joillakin yhtiöillä ei suunnitelmaa ollut ollenkaan, tai se ei ollut tarkoituksenmukainen. Suurhäiriöistä kärsineillä jakeluyhtiöillä yleensä suunnitelmat olivat viety pidemmälle ja toteutuneista myrskyistä oli otettu opiksi. Varautumissuunnitelma todettiin tehokkaimmaksi tavaksi vastata suurhäiriöiden riskiin ja on myös olennaista, että se pidetään ajan tasalla. Raporttien mukaan kehittämiskohteita joilla suurhäiriöihin pystyttäisiin vastaamaan tehokkaammin ja joiden suunnittelua tulisi varautumissuunnitelmissa olla ovat etenkin seuraavat: [7][10]

- resurssit ja niiden tehokas käyttäminen
 - valmiit esisopimukset
- vastuuhenkilöiden määrittäminen
- yhteistyö
 - naapuriverkon haltijat
 - viranomaiset
 - metsäurakoitsijat
- viestiverkot
- tietojärjestelmät
- valvonta.

Edellä mainitut varautumissuunnitelmien kehittämiskohdat ovat asioita, joihin verkkoyhtiöiden tulee investoida. Näiden avulla tulevaisuuden suurhäiriöt voidaan estää tai niiden vaikutuksia pienentää.

5.3 Ongelmat

Ongelmia suuhäiriöihin varautumisessa on etenkin sähköverkon uusimisen kustannukset. Suomen sähköverkko on suurimmalta osin vanhaa ja perustuu vielä pitkälti avojohtoverkoston. Etenkin harvaan asutulla alueella ongelmallista on saada verkon toimintavarmuutta parannettua. Maakaapelointi on kallista, sekä hankalaa toteuttaa. Harvaan asutulla alueella sähköverkon solmupisteiden puuttuminen aiheuttaa ongelmia sähkönjakelun varmuuteen, sillä varayhteyksiä on heikommin. Kuvasta 5.2 näkee kuinka vuoden 2010 jälkeen verkkoyhtiöiden investoinnit ovat lähteneet rajuun kasvuun. Kuitenkaan kaikkea verkkoa ei voida kerralla uusida sillä, se rasittaisi liikaa sekä verkkoyhtiöitä, että heidän asiakkaitaan. [16]



Kuva 5.2 Jakeluverkkoyhtiöiden investoinnit, operatiiviset kustannukset ja liikevoitto vuosilta 2005 – 2015 [16]

Sähkönjakeluverkko on myös osa herkkää infrastruktuuria eikä sitä voida kerralla uusida. Sähköä pitää olla saatavilla jatkuvasti ja korjattava tai uusittava verkko ei voi olla pitkään ilman jännitettä.

6. YHTEENVETO

Sähköverkon suurhäiriöt olivat vielä kaksikymmentä vuotta sitten lähes tuntematon termi ja vasta 2000-luvun myrskyjen jälkeen sitä alettiin tutkimaan paremmin. Nykyään sähköverkon suurhäiriöiden seurauksista puhutaan medioissa lähes kuukausittain. Tämä johtuu etenkin vuoden 2011 myrskyjen jälkeen syntyneestä sähkömarkkina-laista, joka määrittelee sähköjakeluverkon haltijoille selkeät tavoitteet ja velvoitteet. Nämä velvoitteet ovat alkaneet näkymään asiakkaiden sähköjakelun parempana varmuutena, mutta toisaalta sähkön siirtohinnot ovat myös nousseet.

Tässä kandidaatintyössä käytiin ensin läpi Suomen sähköverkon rakenne. Sähköjakelujärjestelmän kantaverkko ja sen haltija Fingrid Oy käytiin nopeasti läpi. Keskityttiin erityisesti jakeluverkkoon ja niiden haltijoihin, sillä suurin osa sähköverkon jakeluhäiriöistä tapahtuu tässä verkossa. Uusi sähkömarkkinalaki käytiin niiltä osin läpi, mikä laissa koskettaa tämän työn aiheita. Etenkin verkonhaltijoiden velvoitteet ja vaatimukset käytiin tarkasti läpi.

Suurhäiriö on vieläkin terminä hieman epäselvä ja tässä työssä se käsiteltiin jakeluverkon haltijan ulkopuolista apua tarvittavana suurena sähkökatkona, joka koskettaa monia ihmisiä ja kestää monia tunteja. Vuonna 2001, 2010 ja 2011 tapahtui monia suuria myrskyjä, jotka aiheuttivat sähköverkon suurhäiriöitä ympäri Suomea. Myrskyt aiheuttivat suuria yhteiskunnallisia ongelmia, ja huomattiin, että yleinen varautuminen oli hyvin puutteellista. Suurhäiriöt aiheuttivat ongelmat jopa viranomaisverkkoon ja verkkoyhtiöiden tiedottaminen oli hyvin puutteellista sähkökatkoksien ja sen jälkit toimiin liittyen.

Sähköverkon suurhäiriöiden vaikutuksia myrskytuhojen ohella tutkittiin ajallisesti ja rahallisesti. Energiaviraston vuosittaisista keskeytystilastoista on nähtävissä, miten ajallisesti sähkökatkot ovat vaikuttaneet ja huomattavaa onkin, että asemakaava-alueen ulkopuolella asuvat ovat selkeästi alttiimpia sähkökatkoille sekä ajaltaan, että kestoaltaan. Energiavirasto on myös tehnyt tutkimuksen, jossa tutkitaan sähköverkon kehittämisen etenemistä ja josta voidaan huomata, että erityisesti vuoden 2010 jälkeen verkkoyhtiöt ovat investoineet jakeluverkkoon miljoonia euroja.

Sähkömarkkina-laissa on määritelty sähkökatkoihin liittyvien vakiokorvausten lisäksi sähköverkon jakeluverkon varmuuden parantaminen. Laki määrittelee korvauksille selkeät rajat, jonka mukaan korvauksen määrä kasvaa keskeytysajan keston mukaan. Myös toimintavarmuuden parantamiselle on annettu määräajat. Lain mukaan vuonna 2028 sähköverkkoyhtiöiden jakeluverkon käyttökatkokset saavat olemaan maksimissaan 6 tuntia asemakaava-alueella, sekä maksimissaan 36 tuntia asemakaava-alueen ulkopuolella.

Työssä tutustuttiin sähköverkon suurhäiriöihin hyvinkin pintapuolisesti. Tämä johtui työn laajuuden rajoittamisesta, sillä kandidaatintyön ideana ei vielä ole välttämättä kirjoittaa täysin tieteellistä tekstiä vaan opettaa tulevaa diplomityötä varten. Aiheesta olisi voinut kirjoittaa hyvinkin syvällisemmin monelta työn osalta, ja erityisesti tulevaisuuden suurhäiriöiden estäminen voisi olla hyvä lopputyön aihealue. Myös itse verkon rakennetta voisi kuvata tarkemmin, jotta olisi selkeämpi nähdä kuinka haavoittuvainen tuulelle ja myrskylle Suomen sähköjakeluverkko on tällä hetkellä.

LÄHTEET

- [1] Kirsi Nousiainen, Opetusmoniste Sähköenergiajärjestelmät, 2016, saatavissa: https://moodle2.tut.fi/pluginfile.php/460910/mod_resource/content/4/DEE11010_Moniste2016.pdf, viitattu 27.4.2018
- [2] Teemu Suvela, Diplomityö, Sähköverkkoyhtiön käyttökeskustoiminnan kehittäminen, 2016, saatavissa: <http://docplayer.fi/storage/62/47217186/1524817796/xNHobiJNWjT9uKJqn-D86w/47217186.pdf>, viitattu 27.4.2018
- [3] Energiavirasto, Sähköverkon haltijat, saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/sahkoverkon-haltijat>, viitattu 27.4.2018
- [4] Sähkömarkkinalaki, 2013, Finlex, saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Pidp452619312>, viitattu 27.4.2018
- [5] Antti Mäkinen, Opetusmoniste, Sähköverkon Häiriöt ja Sähkön Laatu, 2017, saatavissa: https://portal.tut.fi/fi/group/pop/opas/toteutuskerrat?p_p_id=studyGuide-ViewCourseImplementation_WAR_pop&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_resource_id=downloadCourseMaterial&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-1&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&studyGuideViewCourseImplementation_WAR_pop_filePathCode=6&studyGuideViewCourseImplementation_WAR_pop_documentId=172835&studyGuideViewCourseImplementation_WAR_pop_courseImplementationId=70724&studyGuideViewCourseImplementation_WAR_pop_academicYearCode=2017-2018, viitattu 27.4.2018
- [6] Olli Hagqvist, Vesa Hälvä, Heidi Krohns-Välimäki, Janne Sarsama, Janne Strandén, Pekka Verho, Sähköhuollon suurhäiriöiden riskianalyysi- ja hallintamenetelmien kehittäminen – Projektin loppuraportti, 2012 Tampereen Teknillinen Yliopisto, saatavissa: <http://www.tut.fi/cs/groups/public/@l102/@web/@p/documents/liit/mdbw/mdiz/~edisp/p023819.pdf>, viitattu 27.4.2018
- [7] Ville Heinonen, Jukka Perttala, Toiminta sähköjakelun suurhäiriössä, 2012, Konsulttitoimisto Reneco oy, saatavissa: <https://konsulttitoimistoreneco.fi-les.wordpress.com/2012/09/et-suurhc3a4iric3b6-raportti-2012-09-18.pdf>, viitattu 27.4.2018

- [8] Energiavirasto, keskeytystilasto 2016, saatavissa: https://energia.fi/files/1670/Sahkon_keskeytystilasto_2016.pdf, viitattu 27.4.2018
- [9] Ilmatieteen laitos, Tiedote, saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/1006239658>, viitattu 27.4.2018
- [10] Energiavirasto, Kesän 2010 myrskyt sähköverkon kannalta, saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Kes%C3%A4n+2010+myrsky+raportti_lopullinen+_2_.pdf/8b69b8d1-c89d-428c-a3c2-4e2ab5321ddf, viitattu 27.4.2018
- [11] Ilmatieteen laitos, tiedote, saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/1281003911>, viitattu 27.4.2018
- [12] Energiavirasto, Kertomus sähköön toimitusvarmuudesta 2012, 2012, saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Kertomus_sahkon_toimitusvarmuudesta_2012.pdf/dcd94182-8cbd-49ec-ad7a-597fa68346ea, viitattu 5.5.2018
- [13] Yle, Kainuun 5 miljoonan euron sähkökaaoksen taustalla muutakin kuin tykkylumi – Sähköyhtiö tulevasta: "Pistää pelottamaan", 2018, saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10011010>, viitattu 5.5.2018
- [14] Mikko Vainikka, Diplomityö, 2014, saatavissa: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94501/Diplomity%C3%B6_Vainikka.pdf?sequence=2&isAllowed=y, viitattu 27.4.2018
- [15] Energiavirasto, keskeytystilasto 2011, saatavissa: https://energia.fi/files/605/Keskeytystilasto_2011.pdf, viitattu 5.5.2018
- [16] Energiavirasto, Sähköverkkoliiketoiminnan kehitys, sähköverkon toimitusvarmuus ja valvonnan vaikuttavuus, 2016, saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/S%C3%A4hk%C3%B6verkkoliiketoiminnan+kehitys+s%C3%A4hk%C3%B6verkon+toimitusvarmuus+ja+valvonnan+vaikuttavuus+2016.pdf/7a6c1c7a-219e-48b0-bf57-e4bc550e98ea>, viitattu 27.4.2018